

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОДЕКАДНОГО ИНДУКТИВНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ MATLAB

В.Л. Ким, В.Н. Дайнаков

Томский политехнический университет

E-mail: sov@camsam.tpu.ru

В системе MATLAB/Simulink построены simulink-модели многодекадного индуктивного делителя напряжения. Приведен алгоритм получения математических моделей одно- и двухдекадного делителей в форме передаточных функций третьего порядка. Погрешность расчета неравномерности амплитудно-частотной характеристики в области верхних частот 20...200 кГц не превышает 20 %.

Основные достоинства индуктивных делителей напряжения (ИДН) как высокоточных мер отношения проявляются при их использовании совместно с другими измерительными, вычислительными и управляющими устройствами, объединяемыми таким понятием как измерительная система [1]. Наиболее характерный режим работы последней — динамический, когда входной сигнал изменяется во времени. Динамическая погрешность измерительной системы зависит от частотного спектра входного сигнала и инерционности ее звеньев. Тогда математическая модель формирования результата измерения должна включать и динамическую модель измерительной системы [2]. Расчет метрологических характеристик системы, состоящей из звеньев, соединенных между собой различными способами, удобно проводить по их передаточным функциям [1]. Заметим, что передаточная функция относится к одной из полных динамических характеристик средства измерения и по ней могут быть найдены частотные характеристики. Как указывалось в [3] для ИДН важнейшей является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), по которой определяется рабочий диапазон частот делителя по заданному значению амплитудной погрешности.

В работе [3] приведен аналитический метод расчета основных точностных характеристик многодекадного ИДН в области верхних частот 20...200 кГц. Несмотря на наглядность полученных выражений амплитудных погрешностей, их практическое использование связано с проведением трудоемких вычислений. Кроме того, анализ точности двухдекадного ИДН проводился без учета влияния входной цепи. Математическое описание последней и ее связей с выходной цепью приводит к выражениям высокого порядка (не менее двадцати пяти) комплексной переменной $s = \sigma + i\omega$. Очевидно, что только переход к машинным методам проектирования позволяет исследовать сложные процессы в ИДН с учетом большого количества влияющих факторов.

Цель данной статьи — получить математическую модель двухдекадного ИДН в форме передаточной функции.

Объектом исследования является двухдекадный делитель, в котором каскады выполняются путем намотки двух делительных обмоток на общем фер-

ромагнитном тороидальном сердечнике [4].

Формализованное описание ИДН возможно по линейной электрической модели (рис. 1), с высокой точностью отображающей частотные характеристики в указанном выше диапазоне частот [5]. Модель состоит из входной и двух выходных цепей. В общей входной цепи элементы $R1$ и $L1$, $R2$ и $L2$ моделируют импедансы коммутационных элементов и соединительных проводов, $R3$ и $L3$ — активное сопротивление и индуктивность рассеяния делительной обмотки первой декады, $R4$ — активное сопротивление потерь в сердечнике, а $L4$ и $C1$ — индуктивность и емкость первой декады. Выходная цепь последней представляет собой многополюсник с отводами $j=0, 10$ и состоит из последовательно соединенных десяти базовых моделей $MT_1 - MT_{10}$. В этих моделях e_j , r_j , l_{sj} , c_j представляют собой ЭДС, активное сопротивление провода, индуктивность рассеяния j -ой секции и эквивалентную емкость, шунтирующую эту секцию. Последующая декада моделируется базовыми моделями $MT_{11} - MT_{20}$, последовательное соединение которых и является второй выходной цепью двухдекадного делителя. Элементы $R5$ и $L5$, $R6$ и $L6$ имитируют импедансы коммутаторов и соединительных проводов, осуществляющих межкаскадную связь. Импеданс нагрузки Z_n подключается к одному из отводов n ($n=0, 10$) второй декады. Заметим, что в общем случае во входную цепь поступают напряжения от предыдущей декады, что и имитируют источники напряжения U_1 и U_2 . Развязка входной цепи от выходных цепей осуществляется при помощи зависимых источников напряжения $U_5=f_1(U_2)$ и $U_6=f_2(U_1)$, где f_1 , f_2 — линейные операторы преобразования. Из-за этих развязывающих источников напряжения модель ИДН обладает свойством однонаправленности, т.е. передача сигнала происходит только от входа до выхода. Поэтому учет влияния нагрузки и параметров второй декады производится известным путем их пересчета во входную цепь. При этом изменяются лишь значения элементов $R4$, $L4$ и $C1$.

Дальнейший анализ ИДН проведем при следующих допущениях:

- $U_2=0$, т.е. рассматриваются две старшие декады;
- импеданс нагрузки $Z_n \rightarrow \infty$;

- ЭДС секций второй декады в десять раз меньше ЭДС секций первой.

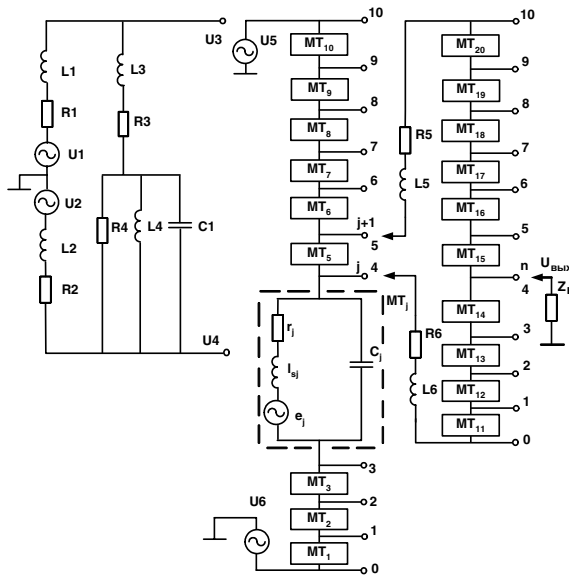


Рис. 1. Эквивалентная схема двухдекадного ИДН

Из рис. 1 видно, что порядок системы дифференциальных уравнений, зависящий от количества реактивностей, и, следовательно, передаточных функций для выходных отводов будет не менее сорока семи. Математическая модель в форме передаточной функции (tf -модель) такого высокого порядка в вычислительном аспекте плохо обусловлена и численно неустойчива [6]. Причина этих затруднений — высокая чувствительность нулей и полюсов передаточной функции к изменению коэффициентов многочленов и ограниченная разрядность машинного слова. Кроме этого, для анализа работы ИДН в частотной области нет необходимости использования передаточной функции выше третьего порядка [3]. Таким образом, успешное решение поставленной задачи будет зависеть от того, удастся ли упростить полную модель и определить вносимые при этом погрешности моделирования.

Редукция полной эквивалентной схемы базируется на следующих обстоятельствах. Во-первых, нагрузка Z_H подключается только к одному из выходных отводов n второй делительной обмотки. Во-вторых, вторая декада подключается только к двум выходным отводам $j, j+1$ первой делительной обмотки. Заметим, что номера отводов декад определяются номинальным значением устанавливаемого коэффициента передачи [3]: $K_{j,n} = 0,1j + 0,01n$, где $j_{max} = 9$.

В этом случае не рассчитываются выходные напряжения для других отводов декад. Тогда каждую из декад можно представить упрощенной моделью — макромоделью (МКМ). МКМ представляет собой простую модель, содержащую минимально необходимое количество базовых моделей в выходной цепи. МКМ построим заменой совокупности последовательно соединенных моделей MT_1-MT_j и $MT_{j+2}-MT_{10}$ эквивалентными им базовыми моделями

ми MT_{21} и MT_{22} , а MT_5 на MT_{j+1} (рис. 2). Во второй декаде модели $MT_{11}-MT_n$, где $MT_n = MT_{14}$, заменяют на MT_{23} , а $MT_{n+1}-MT_{20}$ на MT_{24} .

Параметры элементов эквивалентной базовой модели макромодели, включенной между любыми отводами k, m ($k < m$) делительной обмотки, например, первой декады выражаются через параметры базовых моделей полной модели следующим образом:

$$e_{k,m} = \sum_{j=k+1}^m e_j, \quad r_{k,m} = \sum_{j=k+1}^m r_j, \quad l_{sk,m} = \sum_{j=k+1}^m l_{sj},$$

$$c_{k,m} = (k-m)^{-2} \sum_{j=k+1}^m c_j.$$

Заметим, что для второй декады в этих формулах необходимо заменить индекс j на n .

В работе [7] приведены параметры макромодели первой декады, а в табл. 1 — макромодели второй декады для различных коэффициентов передач при идентичных параметрах секций $e_n = e_0, r_n = r_0, l_{sn} = l_{s0}$ и среднем значении межпроводной емкости C_0 . Заметим, что ввиду симметрии выходной цепи полной модели относительно среднего, пятого отвода [7], параметры макромодели для коэффициентов передач 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 оказываются равными параметрам макромодели для коэффициента передач 0,9; 0,8; 0,7 и 0,6 соответственно. При этом изменяются лишь номера отводов (указаны в скобках).

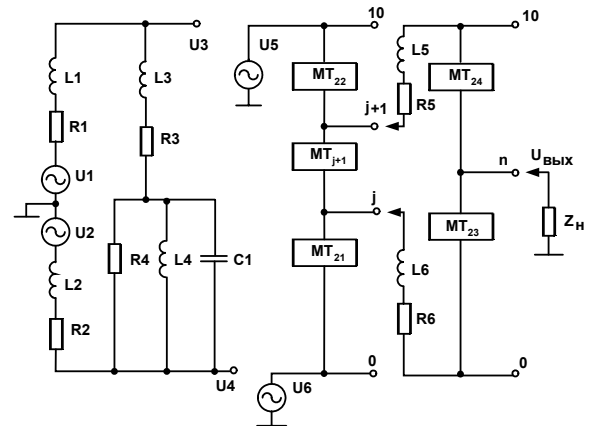


Рис. 2. Упрощенная эквивалентная схема двухдекадного ИДН

Как видно из рис. 2, порядок упрощенной модели двухдекадного ИДН равен 17, что почти в три раза меньше, чем у полной модели. Дальнейший путь понижения порядка модели — разбиение многодекадного ИДН на подсхемы. В качестве последней выбираем однодекадный делитель с выходной цепью, содержащей лишь две базовые модели, как в табл. 1. Тогда расчет первой декады осуществляется в два этапа: для отвода j , затем для отвода $j+1$. Далее напряжения на этих отводах используются как входные для второй декады.

Таким образом, для расчета многодекадного ИДН достаточно иметь макромодель одной декады и знать характеристики взаимодействия (входной и

Таблица 1. Параметры упрощенных моделей однодекадного ИДН

| Коэффициент передачи K_n | Параметры эквивалентной базовой модели | | Выходная цепь макромодели |
|----------------------------|---|---|---------------------------|
| | MT_{24} | MT_{23} | |
| 0,1 (0,9) | $e_{1,10}=9e_0$ $r_{1,10}=9r_0$ $l_{1,10}=9l_0$ $c_{1,10}=1,98C_0$ | $e_{0,1}=e_0$ $r_{0,1}=r_0$ $l_{0,1}=l_0$ $c_{0,1}=4,5C_0$ | |
| 0,2 (0,8) | $e_{2,10}=8e_0$ $r_{2,10}=8r_0$ $l_{2,10}=8l_0$ $c_{2,10}=2,31C_0$ | $e_{0,2}=2e_0$ $r_{0,2}=2r_0$ $l_{0,2}=2l_0$ $c_{0,2}=4,25C_0$ | |
| 0,3 (0,7) | $e_{3,10}=7e_0$ $r_{3,10}=7r_0$ $l_{3,10}=7l_0$ $c_{3,10}=2,64C_0$ | $e_{0,3}=3e_0$ $r_{0,3}=3r_0$ $l_{0,3}=3l_0$ $c_{0,3}=3,94C_0$ | |
| 0,4 (0,6) | $e_{4,10}=6e_0$ $r_{4,10}=6r_0$ $l_{4,10}=6l_0$ $c_{4,10}=2,97C_0$ | $e_{0,4}=4e_0$ $r_{0,4}=4r_0$ $l_{0,4}=4l_0$ $c_{0,4}=3,63C_0$ | |
| 0,5 (0,5) | $e_{5,10}=5e_0$ $r_{5,10}=5r_0$ $l_{5,10}=5l_0$ $c_{5,10}=3,3C_0$ | $e_{0,5}=5e_0$ $r_{0,5}=5r_0$ $l_{0,5}=5l_0$ $c_{0,5}=3,3C_0$ | |

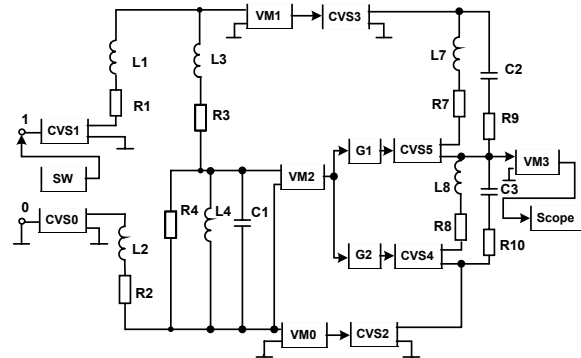
выходной импедансы) декад.

Возможность получения аналитических выражений основных динамических характеристик и в том числе передаточной функции по электрическим моделям позволяет система компьютерной математики MATLAB с пакетом расширения *Simulink* [8]. Далее рассмотрим алгоритм построения математической модели двухдекадного ИДН в форме передаточной функции.

1. Создание *Simulink*-модели однодекадного ИДН

На рис. 3 приведена исходная модель декады ИДН, построенная с использованием библиотеки пакета *Simulink*, входящего в состав MATLAB 6.5. В этой модели элементы входной цепи имеют следующие значения: $R1=R2=0,01$ Ом; $R3=1,2$ Ом; $R4=10$ кОм; $L1=L2=0,01$ мкГн; $L3=11$ мкГн; $L4=4$ Гн; $C1=500$ пФ. Значения элементов выходной цепи получаем из табл. 1 при $r_0=r_{01}=0,12$ Ом; $l_{s0}=l_{s01}=1,1$ мкГн; $C_0=C_{01}=300$ пФ. Например, для коэффициента передачи первой декады $K_1=0,1$ имеем $R7=1,08$ Ом; $L7=9,9$ мкГн; $C2=594$ пФ; $R8=0,12$ Ом; $L8=1,1$ мкГн; $C3=1,35$ нФ; $R9=R10=10^{-5}$ Ом. Последние элементы, т.е. $R9$ и $R10$, отсутствующие в базовых моделях MT_{23} , MT_{24} , необходимы для обеспечения запуска *Simulink*-модели на моделирование. Как показали машинные эксперименты, столь малые значения сопротивлений не влияют на результаты моделирования. Кроме R , L , C элементов в *Simulink*-модели используются следующие блоки: управляемые источники напряжения (*Controlled Voltage Source*) $CVS0$ – $CVS5$, измерители напряжений (*Voltage Measurement*) $VM0$ – $VM2$, умножители (*Gain*) $G1$ со множителем 0,9 и $G2$ со множителем 0,1. Для проверки работоспособности модели к низкопотенциальному (узел 0) и высокопо-

тенциальному (узел 1) входам подключаются источники синусоидального сигнала (*Sine Wave*) SW , имитирующие выходные напряжения предыдущей декады (рис. 1). Если моделируется первая, старшая декада, то $U_2=0$ и узел 0 заземляется. Тогда в *simulink*-модели используется только один источник входного напряжения как показано на рис. 3. Наблюдение выходного сигнала осуществляем с помощью вольтметра $VM3$ и осциллографа (*Scope*). Настройка параметров всех блоков производится стандартно [9]. Далее сохраняем созданную *Simulink*-модель под именем *ivd01.mdl* и задаем параметры моделирования. Для этого в меню *Simulation/Simulation parameters/Solvers* устанавливаем следующие первостепенные данные: *Start time* – 0,0; *Stop time* – 1,0; *Type* – *Variable-step, ode 23 tb [stiff/TR-BDF 2]*. Следует обратить внимание на последнюю опцию (метод решения дифференциальных уравнений). Как показали машинные эксперименты, только метод *ode 23 tb* позволяет осуществить моделирование разработанной *Simulink*-модели ИДН.

**Рис. 3.** *Simulink*-модель однодекадного ИДН

После запуска модели кнопкой *Start Simulation* результаты работы можно наблюдать в окне осциллографа в виде сигнала синусоидальной формы с амплитудой в десять раз меньшей амплитуды входного сигнала и той же частоты. Убедившись в правильности работы *Simulink*-модели, переходим к следующему этапу решения поставленной задачи.

2. Получение передаточной функции

Для получения передаточной функции, построенной выше модели, воспользуемся функциями расширений MATLAB – функцией *power2sys* и функцией *tf*. Первая функция позволяет получить непрерывную модель объекта исследования в пространстве состояний. Для этого набираем в командном окне MATLAB

» *ivd01ss = power2sys ('ivd01', 'ss')*.

После выполнения этой команды получим матрицы A , B , C , D для уравнений пространства состояний (ввиду громоздкости выражений здесь не приводим). Далее используем функцию *tf* для получения передаточных функций

» *ivd01tf = tf(ivd01ss)*.

В результате выполнения этой команды получим передаточные функции (условные записи): $W00$, $W01$, $W02$, $W10$, $W11$, $W12$, $W23$, $W33$, $W43$, $W53$, где $W00$ – передаточная функция от входа $CVS0$ до выхода $VM0$, $W01$ – передаточная функция от входа $CVS0$ до выхода $VM1$ и т.д. Эти функции представляются в виде отношения многочленов комплексной переменной s . Например, для $W00$ имеем следующее выражение

$$W00 = \frac{0,9991s^3 + 3,096e5s^2 + 1,815e14s + 5,49e13}{s^3 + 3,107e5s^2 + 1,815e14s + 5,535e13}.$$

Заметим, что из-за использования измерителей $VM0$ – $VM2$ в качестве развязывающих блоков входной и выходной цепей *Simulink*-модели не удастся сразу получить искомую передаточную функцию 'вход-выход' $W13$: в командном окне выдается сообщение “*Transfer function from input “U_CVS1” to output “U_VM3”: 0*”.

С целью получения передаточной функции $W13$ создаем модель ИДН из блоков передаточных функций (рис. 4). При создании этой модели использовались блоки *'Transfer Fcn'* раздела *Continuous*, *'Gain'* и *'Sum'* раздела *Math* пакета *Simulink*. Сохраняем эту модель под именем *ivd01sim*. Следует отметить важную особенность исходной *Simulink*-модели, приведенной на рис. 3. Если источник SW подключить к узлу 0, а узел 1 заземлить, то при тех же значениях элементов выходной цепи получим *Simulink*-модель ИДН для выходного отвода $j=9$, т.е. $K_9=0,9$. Структурная схема будет отличаться лишь передаточными функциями блоков входной цепи.

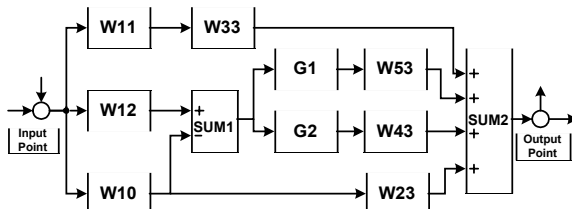


Рис. 4. Структурная схема однодекадного ИДН

Таким образом, для моделирования всех десяти отводов ИДН достаточно иметь пять *Simulink*-моделей, отличающихся лишь параметрами элементов выходных цепей макромоделей (табл. 1).

Передаточную функцию 'вход-выход' блочной модели можно получить с помощью специального средства просмотра временных и частотных характеристик модели – *LTI-Viewer*, входящего в состав пакета *Control System Toolbox* [6, 8]. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

- открыть файл *ivd01sim* и в меню *Tools* выполнить команду *Linear analysis*. Результатом является запуск *LTI-Viewer*;
- в открытом окне *LTI-Viewer* выбрать меню *Simulink* и выполнить команду *Get Linearized model*. В результате будет получена линеаризованная модель;
- в окне *LTI-Viewer* выполнить команду *File/Ex-*

port/Export to Workspace. В рабочей области MATLAB будет создана структура с именем *ivd01sim_1* с матрицами A , B , C , D уравнений пространства состояний. Матрицы можно получить следующим образом: » $[A,B,C,D] = ssdata(ivd01sim_1)$;

- получить передаточную функцию, набрав в командном окне » *ivd01t=tf(ss(A, B, C, D))*.

В результате в командном окне появится выражение передаточной функции в виде отношения двух многочленов двадцать пятого порядка.

- понизить порядок модели, т. е. получить редуцированную *rff*-модель. Вначале формируем сбалансированную реализацию с помощью функции *balreal* пакета *Control System Toolbox*. Как показали исследования сбалансированную реализацию можно получить только для моделей не выше девятого порядка. Поэтому в передаточной функции *ivd01t* оставляем полиномы только девятого порядка. Новую передаточную функцию запоминаем под именем *ivd01_9t* и построим для нее сбалансированную реализацию » $[ivd01b,g] = balreal(ivd01_9t)$.

В результате получаем вектор g , содержащий диагональные элементы результирующего грамиана $g=0,2212; 0,2129; 0,0028; 0; 0; 0; 0; 0; 0$.

Теперь понижаем порядок модели путем удаления нулевых состояний грамиана с помощью функции *modred* » *ivd01r = modred(ivd01b, 4:9, 'del')*.

После выполнения этой функции в командном окне появится выражение искомой передаточной функции

$$W13 = \frac{0,1166s^3 + 2,646e4s^2 + 4,115e12s + 1,301e12}{s^3 + 2,452e5s^2 + 4,115e13s + 1,232e13}.$$

- сравнить нередуцированную и редуцированную математические модели. Загружаем в рабочую среду *LTI-Viewer* модели *ivd01t* и *ivd01r* с помощью функции *ltiview* [6, 8]. В меню *Plot Configurations* выбираем *Bode magnitude* и по графикам АЧХ определяем их неравномерности в области верхних частот (табл. 2). Сравнение результатов проводим по критерию максимального относительного отклонения амплитудных погрешностей в рабочем диапазоне частот $\epsilon_{imax} = \max(|\gamma_{ir} - \gamma_{it}|) / \gamma_{it} \cdot 100\%$, где γ_{it} , γ_{ir} – относительные погрешности коэффициента передачи K_i моделей *ivd01t* и *ivd01r*.

Таблица 2. Результаты сравнительного расчета погрешностей полной и редуцированной моделей

| Частота, кГц | Относительная погрешность γ_i , % | | Критерий сравнения ϵ_i , % |
|--------------|--|---------------|-------------------------------------|
| | <i>ivd01t</i> | <i>ivd01r</i> | |
| 20 | –0,010 | –0,011 | 10 |
| 50 | –0,040 | –0,042 | 5 |
| 100 | –0,160 | –0,170 | 6 |
| 200 | –0,650 | –0,670 | 3 |

Из табл. 2 следует, что $\varepsilon_{l_{\max}}=10\%$. Заметим, что для редуцированных моделей (также третьего порядка) всех других выходных отводов ИДН ($j \neq 1$) $\varepsilon_j < 9\%$. Таким образом, полную модель можно заменить редуцированной с погрешностью не более 10 %.

3. Создание Simulink-модели двухдекадного ИДН

Точность многодекадных ИДН снижается при малых уровнях выходного напряжения [3]. Рассмотрим процесс создания модели двухдекадного делителя для коэффициента передачи $K_{jn}=0,01$. Модель строим на основе схемы, приведенной на рис. 4. В новой модели (рис. 5), сохраненной под именем *ivd001*, как и в прототипе входная общая цепь отображается блоками с передаточными функциями $W10$, $W12$ и сумматором $SUM1$. Первая декада моделируется блоком с передаточной функцией $W13$. Элементы $R11$, $L9$, $C4$, $R13$ и $R12$, $L10$, $C5$, $R14$ являются компонентами макромодели второй декады, и их значения находим из табл. 1 для $K_n=0,1$ при $r_0=r_{02}=0,15$ Ом; $L_{30}=L_{302}=0,1$ мкГн; $C_0=C_{02}=20$ пФ; $R11=1,35$ Ом; $L9=0,9$ мкГн; $C4=39,6$ пФ; $R12=0,15$ Ом; $L10=0,1$ мкГн; $C5=90$ пФ; $R13=R14=10^{-5}$ Ом. Передача сигнала с входной цепи в выходную цепь второй декады осуществляется через умножители $G3$, $G4$ с коэффициентами передачи 0,09 и 0,01 соответственно и управляемые источники напряжения $CVS8$, $CVS9$. Вторая декада подключается к выходу первой посредством управляющих источников напряжения $CVS6$, $CVS7$. Следует отметить, что для учета взаимовлияния декад в элементы связи $R5$, $R6$, $L5$, $L6$ необходимо включить активную и индуктивную составляющие выходных импедансов отводов $j, j+1$ первой декады, к которым подключается вторая, т.е.

$$R5=R_{kj+1}+R_{ej+1}+R_{выхj+1}, R6=R_{kj}+R_{ej}+R_{выхj},$$

$$L5=L_{kj+1}+L_{ej+1}+L_{выхj+1}, L6=L_{kj}+L_{ej}+L_{выхj},$$

где $R_{k(j)}$, $R_{e(j)}$, $R_{вых(j)}$ и $L_{k(j)}$, $L_{e(j)}$, $L_{вых(j)}$ – активные сопротивления и индуктивности коммутационных элементов, соединительных проводов и выходного импеданса.

Составляющие выходного импеданса рассчитываются по формуле [10]

$$Z_{выхj} = 0,1j(10-j)Z_0,$$

где Z_0 – среднее значение активного сопротивления (r_{01}) или индуктивности рассеяния (l_{301}) секции первой декады.

Для $j=0$ $R_{вых0}=0$ и $L_{вых0}=0$, а для $j=1$ $R_{вых1}=0,9r_{01}=0,108$ Ом и $L_{вых1}=0,9l_{301}=0,99$ мкГн. Пусть $R_{k0}=R_{k1}=R_{c0}=R_{c1}=0,05$ Ом, а $L_{k0}=L_{k1}=L_{c0}=L_{c1}=0,05$ мкГн. Тогда $R5=0,208$ Ом, $L5=1,09$ мкГн, $R6=0,1$ Ом, $L6=0,1$ мкГн.

В процессе проверки работоспособности модели результаты моделирования можно наблюдать на экране осциллографа, подключенного к выходу ИДН через вольтметр $VM4$.

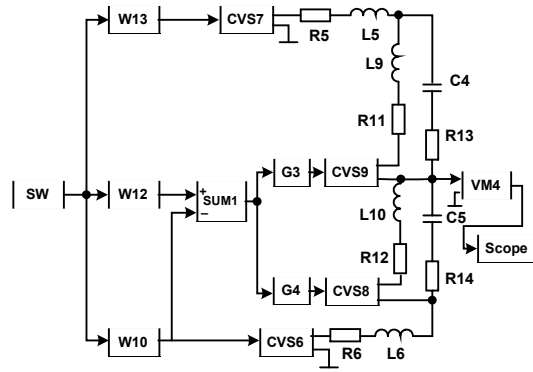


Рис. 5. Simulink-модель двухдекадного ИДН

4. Получение передаточной функции двухдекадного ИДН

Как и в п. 2 алгоритма используем функции *power2sys* и *tf*. Получаем передаточные функции $W64$, $W74$, $W84$, $W94$ и создаем модель из блоков передаточных функций (рис. 6). Сохраняем ее под именем *ivd001sim*. Далее с помощью *LTI-Viewer* получаем матрицы A , B , C , D уравнений пространства состояний, а затем и передаточную функцию 'вход-выход' двадцать девятого порядка. После понижения порядка с помощью функций *balreal* и *modred* получаем искомую редуцированную передаточную функцию

$$W14 = \frac{0,01113s^3 + 2354s^2 + 2,702e1s + 1,786e1}{s^3 + 1,44e5s^2 + 2,703e13s + 8,233e12}.$$

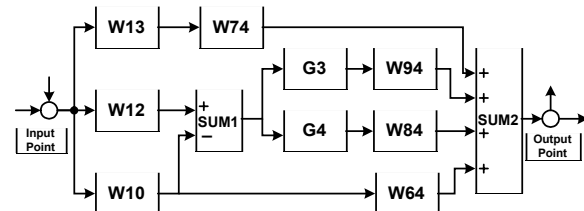


Рис. 6. Структурная схема двухдекадного ИДН

5. Оценка качества модели

Качество разработанной модели определяем по одной из основных ее целевых свойств – адекватности. Под адекватностью понимаем степень соответствия модели физическим процессам, протекающим в ИДН. Численная мера адекватности – погрешность модели. Тогда точность модели – характеристика качества модели, отражающая близость ее погрешности к нулю. Погрешность модели может быть оценена по результатам измерений АЧХ реального ИДН и вычислений АЧХ модели. Однако этот метод требует проведения трудоемких натурных экспериментов с использованием прецизионной измерительной аппаратуры. Наиболее просто точность модели можно оценить методом сравнения ее с эталоном. В табл. 3 приведены результаты расчетов на частоте 100 кГц неравномер-

ностей амплитудно-частотных характеристик по редуцированным передаточным функциям и эталонной *PSpice*-модели двухдекадного ИДН, созданной при помощи системы проектирования OrCAD 9.2 [5, 7].

Таблица 3. Относительная погрешность коэффициента передачи $\gamma_{j,n}$, %

| Коэффициент передачи $K_{j,n}$ | Тип модели | | Критерий сравнения $\varepsilon_{j,n}$, % |
|--------------------------------|------------|---------------|--|
| | <i>rtf</i> | <i>PSpice</i> | |
| 0,01 | -0,200 | -0,210 | 5 |
| 0,02 | -0,110 | -0,120 | 8 |
| 0,03 | -0,076 | -0,083 | 8 |
| 0,04 | -0,064 | -0,068 | 6 |
| 0,05 | -0,054 | -0,058 | 7 |
| 0,06 | -0,048 | -0,052 | 8 |
| 0,07 | -0,045 | -0,047 | 4 |
| 0,08 | -0,049 | -0,044 | 11 |
| 0,09 | -0,050 | -0,043 | 17 |

Из табл. 3 следует, что для двухдекадного делителя $\varepsilon_{2max}=17$ % и определяется критерием сравнения $\varepsilon_{j,n}=\varepsilon_{0,09}$ для коэффициента передачи $K_{j,n}=0,09$.

Это обусловлено снижением точности средств графического интерфейса *LTI-Viewer* [6] при расчете малых отклонений АЧХ и использованием вместо полных моделей редуцированных. Максимальная погрешность последних с учетом погрешности эталонной модели $\varepsilon_s=3$ % [7] равна $\varepsilon_n=\varepsilon_{2max}+\varepsilon_s=20$ %. Такая точность моделей достаточна для большинства практических расчетов, выполняемых при проектировании новых структур и схем многодекадных ИДН.

Таким образом, предложенный в работе алгоритм упрощения эквивалентных схем и создания *Simulink*-моделей позволяет получить математические модели многодекадных ИДН в форме передаточных функций. По этим моделям в системе MATLAB обеспечивается проведение исследований частотных характеристик и выполнение расчетов основных метрологических характеристик делителей с приемлемой точностью. Порядок передаточных функций не превышает трех, поэтому они удобны при моделировании измерительных систем, содержащих ИДН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 42 с.
- Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. – М.: Высшая школа, 2002. – 348 с.
- Ким В.Л. Расчет погрешностей многодекадного индуктивного делителя напряжения // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 121–125.
- Ройтман М.С., Калинин Н.П. Индуктивные делители напряжения // Измерения, контроль, автоматизация: Научно-техн. сб. обзоров ЦНИИТЭИ приборостроения. – М., 1978. – Вып. 2(14) – С. 24–32.
- Kim V.L., Silushkin S.V., Plotnikov A.N. Mathematical Models and Methods of Multidecade Inductive Voltage Divider Calculation // Proc. of the IEEE. – Siberian Conference on Control and Communications. SIBCON-2003. – Tomsk, Russia, Oct. 1–2, 2003. – P. 98–101.
- Медведев В.С., Потемкин В.Г. Control System Toolbox / Под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 287 с.
- Ким В.Л., Силушкин С.В., Ильин А.Б. Моделирование кодоуправляемых индуктивных делителей напряжения на ЭВМ // Современные техника и технологии: Труды IX междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2003. – Т. 1. – С. 126–128.
- Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 576 с.
- Анохин В.В. Модели динамических систем: технологии построения в MATLAB // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 4. – С. 54–59.
- Ким В.Л. Расчет выходного импеданса индуктивного делителя напряжения с симметрирующей обмоткой // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 145–148.